Korean J. Environ. Biol. 30 (3) : 210~218 (2012)

남서해역에서 양식되는 방사무늬김 (*Porphyra yezoensis* Ueda)의 Diving-PAM에 의한 광합성 특성

김정배* · 이원찬 · 김형철 · 최희구 · 박정임[1] · 조윤식 · 박환희

국립수산과학원 어장환경과, [1]해양생태기술연구소

Photosynthetic Characteristics of *Porphyra yezoensis* Ueda Measured in situ by Diving Pulse-Amplitude Modulated (PAM) Fluorometry on the Southwestern Coast of the Korean Peninsula

Jeong Bae Kim*, Won-Chan Lee, Hyung Chul Kim, Hee-Gu Choi, Jung-Im Park[1], Yoonsik Cho and Hwan Hee Park

Marine Environment Research Division, National Fisheries Research and Development Institute, Busan 619-705, Korea
[1]Marine Eco-Technology Institute, Busan 608-830, Korea

Abstract - The morphological characteristics, carbon and nitrogen concentrations, stable isotope values and photosynthetic rates of *Porphyra yezoensis* were studied at the main purple lavers production areas on southwestern coast of Korea. The morphological characteristics of leaf length, leaf width and weight of *Porphyra* blades were between 11.6～16.3 (average 13.8) cm, 4.6～6.3 (average 5.4) cm, 1.1～2.6 (average 1.86) g DW m^{-2}, respectively. Photosynthetic pigment of Chl *a* concentration of *Porphyra* blades was between 2.18～17.77 (average 9.65) mg DW Chl *a* m^{-2}. Carbon and nitrogen concentrations of *Porphyra* blades was between 201～317 (average 240) mg DW g^{-1}, 39.8～50.0 (average 43.5) mg DW g^{-1} and C/N ratio 5.0～6.7 (average 5.5). The range of average $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ values of *Porphyra* blades was between −25.6 to −24.0 (average −24.7)‰ for $\delta^{13}C$, and 1.3 to 4.1 (average 2.1)‰ for $\delta^{15}N$. Photosynthetic characteristics of seaweeds measured by pulse amplitude modulation (PAM) fluorometry was used as an indicator of photosynthetic activity. We use Diving-PAM fluorometry to examine photosynthetic rates of the seaweeds *Porphyra yezoensis* at each station. Maximum quantum yield of *Porphyra* blades was between 0.46～0.55 (average 0.52), the variance of the effective PS II maximum quantum yield of the station was broadly similar. Maximum relative electron transport rate (rETRmax) of *Porphyra* blades was between 4.71～5.84 (average 5.33) μmol electrons m^{-2} s^{-1}, the changes of maximum relative electron transport rate (rETRmax) of *Porphyra yezoensis* were similar to those of PS II maximum quantum yield. Photosynthetic efficiency (α) was between 0.027～0.045 (average 0.036). Minimum saturating irradiance (E_k) range was 139～180 (average 156) μmol photons m^{-2} s^{-1}. Minimum saturating irradiance (E_k) made a difference by station within the area on southwestern coast. Carbon and nitrogen concentrations and photosynthetic rates of *Porphyra* blades production areas on southwestern coast were broadly similar. The photosynthetic characteristics showed low

* Corresponding author: Jeong Bae Kim, Tel. 051-720-2521, Fax. 051-720-2515, E-mail. jbkim@nfrdi.go.kr

photosynthetic rates because the low maximum quantum yields and low maximum relative electron transport rate.

Key words : Diving-PAM, *Porphyra yezoensis*, maximum quantum yield, rETRmax

서 론

김은 우리 나라 국민의 기호식품 중의 하나이며, 빛과 엽록소에 의한 광합성에 의하여 이산화탄소를 고정하고, 산소를 발생시키는 일차생산자로서의 역할을 담당하고 있다(강과 고 1977; 김 1996; 홍 2001).

광합성은 실제로 물의 광분해에 의해 엽록소 *a*에서 궤도를 이탈한 전자가 즉시 에너지를 방출하지 않고 틸라코이드 막에 정교하게 배열되어 있는 여러 개의 전자 운반자로 구성되어 있는 전자 전달계에 포획되어 광계 II에서 광계 I로 이동하면서 화학적인 에너지(ATP와 NADPH)를 합성하는 과정이다(김 1996; 홍 2001).

식물에 의한 광합성의 빛은 작지만 고도로 조직화 되어 있는 엽록체에 의하여 포획되고, 엽록체(chloroplast)는 방사에너지의 광자(photon)를 전기에너지로 바꾼 후 화학에너지로 전환시킬 수 있는 능력이 있으며, 광합성 과정은 전자 전달계(electron transport system)를 통해 빛을 요구하여 계에 에너지를 충전 시키는 반응인 명반응과 빛을 요구하지 않고 다시 계를 원래 상태로 되돌리는 반응인 암반응이 있다(홍 2001; Chung *et al*. 2002).

엽록소에서 방출되는 형광은 광합성 초기 광화학반응에 사용되지 못한 빛 에너지의 일부가 다시 빛으로 방출되는 것이다. 이와 같이 버려지는 에너지로서 형광은 식물에게는 쓸모가 없으나 광화학 반응이 감소하면 형광이 증가하며 광화학 반응이 증가하면 형광이 감소하는 반대적인 양상을 보이므로 PAM에 의한 형광의 측정 및 분석을 통하여 광합성 기구의 구조 및 기능의 변화를 민감하게 알 수 있다(Chung *et al*. 2002). 광합성 특성을 구하기 위하여 많은 연구자들이 엽록소 형광을 이용한 PAM을 이용하고 있는데, 이것은 비파괴적이고, 빠르고, 믿을 수 있는 방법으로 생태학적 연구, 농수산, 임업분야에서 생산성 및 병리학적 연구가 다양하게 이용될 수 있다(Chung *et al*. 2002). 조사 지역의 특성상 해수에 노출 되어있으며 방사무늬김의 보관 등의 문제점이 있어 현장에서 직접 Diving-PAM을 이용하였다.

국내에서의 김의 연구는 한국산 홍조식물 참김과 방사무늬김의 온도반응(황 등 1997), 참김 색소 및 형태 변이체의 순계주 분리 및 특성(황 등 2010), 고농도 암모늄에 노출되었을 때 방사무늬김의 생리적 반응(Kang *et al*. 2009), 방사무늬김의 일반성분 및 미네랄 함량(목 등 2011), 방사무늬김 형질의 유전 방식(Shin 2003), 해양 환경 특성에 따른 방사무늬김의 광합성 색소 조성 및 농도(김 등 2012) 등이 있으나, 탄소 및 질소 성분과 현장에서 방사무늬김의 Diving-PAM 등에 의한 광합성 특성에 대한 연구는 거의 찾아 볼 수가 없었다.

본 연구에서는 남서해역에서 양식되고 있는 방사무늬김 (*Porphyra yezoensis* Ueda)의 형태적 조사, 탄소와 질소 농도 및 안정동위원소 비를 분석하여 서식지역의 화학적인 요소 분석을 하였고, Diving-PAM에 의한 비파괴적으로 분석이 가능한 방사무늬김의 광합성 효율과 특성인 양자수율(quantum yield), 상대전자전달률(relative electron transport rate, rETR), 기울기, 포화광을 구하여 서식지역의 화학적인 요소와 방사무늬김의 광합성 효율과의 관계를 알아보고자 하였다.

재료 및 방법

1. 김의 형태 및 성분 분석

본 연구는 2011년 3월에 남서해역에 양식되고 있는 방사무늬김의 광합성 특성을 비교분석 하기 위하여, 방사무늬김의 채취 주기가 약 한 달인 것을 감안하여 첫 번째 채취 후 3주 후의 김을 대상으로 6개 조사정점에서 형태적 조사, 탄소와 질소 농도 및 안정동위원소 비,

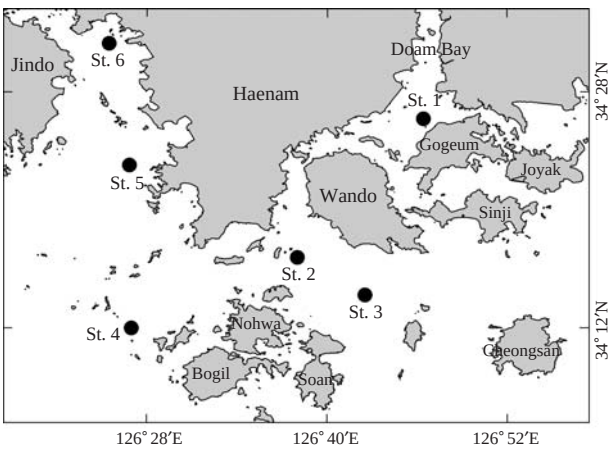

Fig. 1. Seaweed study area. Seaweed observed in dotted area on the southwestern coast of the Korean peninsula.

Diving-PAM에 의한 광합성 특성 조사를 실시 하였다 (Fig. 1). 현장에서 김의 형태적 조사를 위한 시료들은 얼음을 채운 쿨러에 보관하였고, Chl *a*, 탄소와 질소 농도 및 안정동위원소 비 분석을 위한 시료는 드라이아이스를 채운 쿨러에 보관하여 실험실로 운반하였다.

방사무늬김의 형태적 조사를 위한 시료들은 표본을 만들어 각 정점당 길이와 폭을 0.1 mm 단위까지 측정하였고, 방사무늬김 엽체의 단위 면적당 엽중량은 방사무늬김 엽체 한 개체를 평면으로 펼쳤을 때의 단위면적당 무게로서, 분석은 방사무늬김 엽체 표본을 구경 1 cm 크기로 펀칭하여 무게를 0.1 mg 단위까지 측정한 후 단위 면적으로 계산 하였다.

방사무늬김 시료들은 냉동시킨 후 동결 건조시킨 다음 볼 분쇄기 (pulverisette 23, Fritsch, Germany)로 미세하게 분쇄하였다. 분쇄된 시료 중 0.01 g의 건 시료를 10 mL culture tube에 넣고 100% acetone 5 mL을 넣어 내부표준물질 canthaxanthin을 50 µL첨가한 뒤 초음파 분쇄를 5분 정도 실시하고, −20°C의 냉암소에서 24시간 추출 하였다 (Wright *et al.* 1991; Jeffrey 1997). 24시간의 추출하고, 2,000 rpm에서 10분 동안 원심 분리하여 상등액을 0.45 µm PTFE filter로 여과하였다. 이 중 시료 1 mL와 300 µL의 HPLC grade water를 vial에 넣어 잘 혼합한 후 HPLC 100 µL loop에 주입하여 분석하였다. Chl *a* 농도는 색소를 분석한 후 면적당 농도로 계산 하였다.

탄소 (C), 질소 (N) 농도와 탄소 ($\delta^{13}C$) 및 질소 ($\delta^{15}N$) 안정동위원소 비 분석을 위한 방사무늬김 시료는 동결 건조시킨 다음 볼 분쇄기 (pulverisette 23, Fritsch, Germany)로 미세하게 분쇄하였다. 분쇄된 방사무늬김 시료 중 1～2 mg의 건 시료를 CHN분석기 (Flash EA 1112, Thermo Finnigan, Italia)를 이용하여 탄소와 질소를 분석한 후 계산 하였다.

안정동위원소 조성은 CNS 원소분석기와 연결된 안정동위원소 질량분석기 (IR-MS, Isotope Ratio-Mass spectrometer, Micromass IsoPrime, UK)를 이용하여 탄소 ($\delta^{13}C$) 및 질소 ($\delta^{15}N$) 동위원소를 분석 하였다. 방사무늬김이 가지는 안정동위원소 비 값은 아래 식으로 계산되었으며, 표준물질에 대한 각 시료의 비 값을 천분율로 나타내었다.

$$\delta X\,(‰) = [R_{sample}/R_{standard} - 1] \times 1000,$$

X: ^{13}C 또는 ^{15}N, R: 시료 및 표준물질의 $^{13}C/^{12}C$과 $^{15}N/^{14}N$ 비

표준물질 (standard)로는 탄소의 경우는 PDB (Pee Dee Belemnite), 질소의 경우는 대기 중 질소 (atmospheric N_2)의 국제표준 기준을 사용하였다. 실제 분석에서 각각 20개의 urea를 이용하여 측정한 탄소와 질소의 안정동위원소를 분석한 결과 표준편차 (standard deviation)는 각각 ±0.2‰과 ±0.3‰로 매우 높은 정밀도와 재현성을 나타내었다.

2. Diving-PAM에 의한 광합성 특성

방사무늬김 엽체를 10분 동안 암 적응시켜 현장에서 Diving-PAM (Walz, Germany)을 이용하여 상대적인 양자수율을 구하였다. 광화학 양자 수율은 광합성 명반응 중 광계 II의 광화학 반응에 대한 양자수율 (최와 김 2005)을 의미 하고, 광합성 효율은 광계 II에서 광계 I로 이동하면서 화학적인 에너지를 합성하는 과정이므로 ETR-전자 전달율 (electron transport rate)로 표현된다 (김 1996; 홍 2001). 전자 전달률은 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다 (Ralph *et al.* 1998; Schreiber 2004).

ETR=quantum yield ([F'm−F]/F'm)∗PAR∗0.5∗ETR−factor, 방사무늬김 엽체의 엽록체에서 흡수된 빛을 상대적으로 이용하였으므로 이하에서는 상대 전자 전달률 (rETR: relative electron transport rate)로 표현되며, 상대 전자 전달률은 단위 엽록소 당 전자 전달률로 잠재적인 광합성 능력을 의미한다 (최와 김 2005).

전자전달을 위한 포화광량 (E_k)은 E_k=rETRmax/α로서 계산되며, 광합성 반응은 Diving-PAM의 빛 보정 기능 프로그램에 의해 내부 할로겐 광원으로부터 사전에 인식된 광량 (PAR, 0, 20, 78, 220, 420, 667, 950, 1,200, 1,450 µmol photons m^{-2} s^{-1}) 범위에서 측정하였다. 현장에서 채집한 김 시료는 엽체의 중앙에서 dark leaf clip을 이용하여 각 정점당 12회씩 측정하여 평균값을 사용하였다.

3. 통계분석

방사무늬김 엽체의 엽장, 엽폭, 단위면적당 김 엽체의 엽중량, 탄소와 질소 농도와 탄소와 질소 동위원소 비에 대하여 통계분석을 하였다. 통계적으로 유의한 차이는 normality로 검정한 후 one-way ANOVA로 homogeneity of variance와 유의성을 검정하였다 ($P < 0.05$). 통계분석은 SPSS 10.1을 이용하였으며, 측정치는 평균 (mean)과 표준오차 (SE)로 나타내었다.

결 과

1. 김의 형태, Chl *a*, 탄소와 질소 농도 및 동위원소 비

일반적으로 많이 양식되는 방사무늬김 (*Porphyra yezoensis* Ueda)에 대하여 엽체의 형태적 특성, 탄소 및 질소

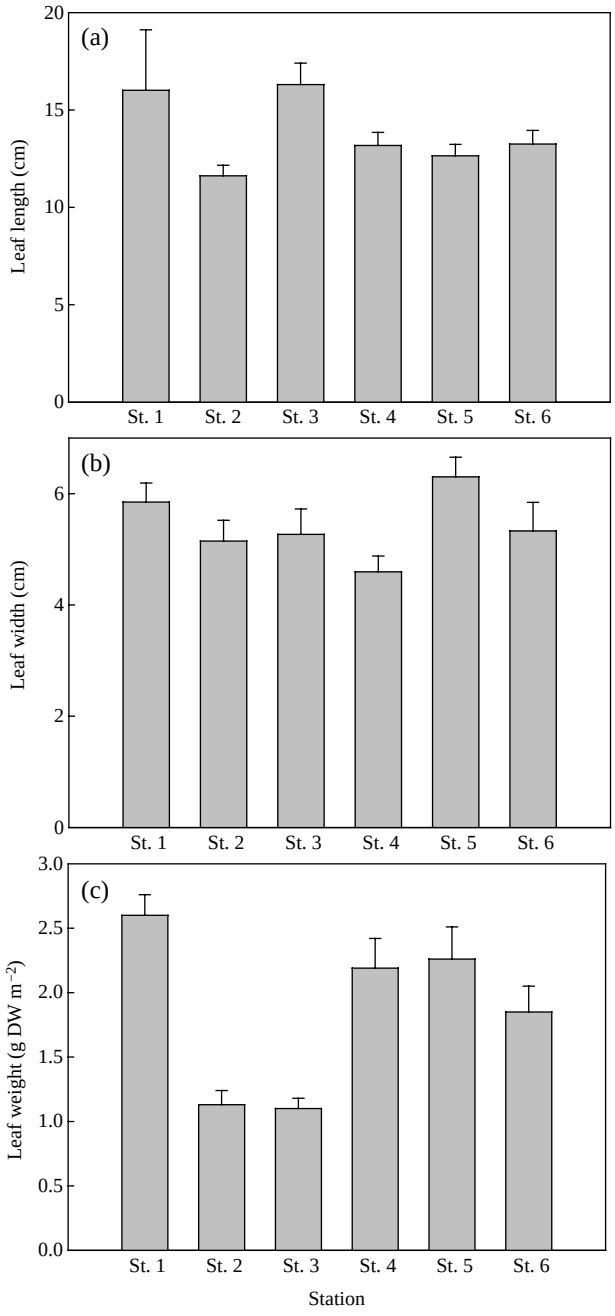

Fig. 2. Morphological characteristics of the *Porphyra yezoensis* Ueda occurred on the southwestern coast of the Korean peninsula. Leaf length (a), Leaf width (b), Weight (c). Seaweed collected at the study site in March 2011 (n=30).

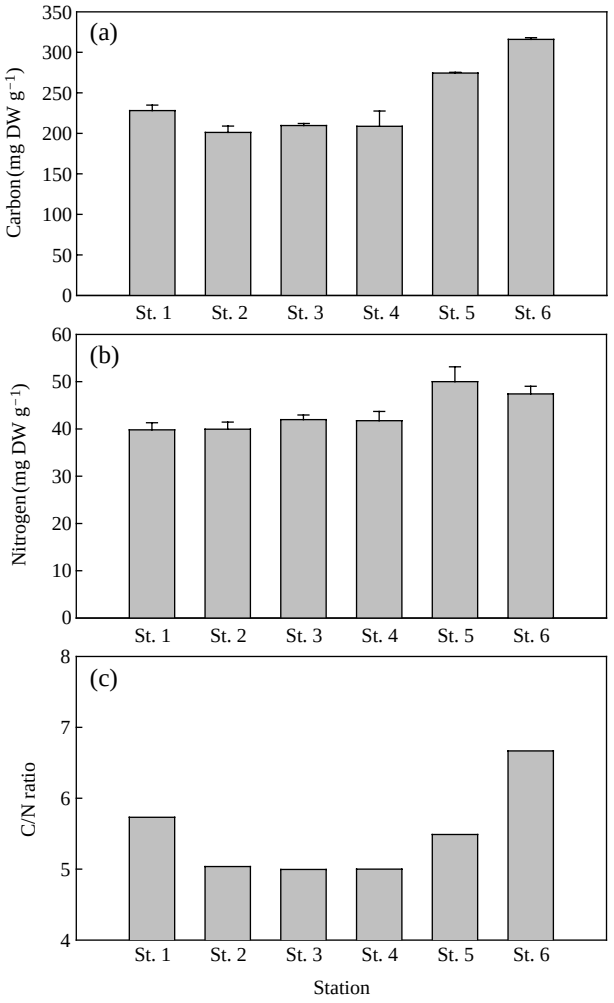

Fig. 3. Carbon and nitrogen concentrations of the *Porphyra yezoensis* Ueda occurred on the southwestern coast of the Korean peninsula. Leaf carbon concentrations (a), Leaf nitrogen concentrations (b), Leaf C/N ratio (c). Seaweed collected at the study site in March 2011 (n=3).

성분의 농도를 측정하였다. 조사기간 동안 방사무늬김의 형태적 특성에 대해서 살펴보면 최대 평균 엽장은 정점 3의 16.3±1.1 cm, 최저 평균 엽장은 정점 2의 11.6±0.5 cm이었으며 (Fig. 2a), 최대 평균 엽폭은 정점 5의 6.3±0.4 cm, 최저 평균 엽폭은 정점 4의 4.6±0.3 cm이었고 (Fig. 2b), 전체 평균 엽장은 13.8±1.1 cm, 평균 엽폭은 5.4±0.4 cm이었다. 단위면적당 방사무늬김 엽체의 엽중량 최대 평균값은 조사정점 1번으로서 2.60±0.16 g DW m^{-2}이었고, 최저 평균값은 조사정점 3번으로서 1.10±0.08 g DW m^{-2}이었으며, 전체 평균 엽중량은 1.86±0.17 g DW m^{-2}로서 조사 정점 2번과 3번을 제외한 정점이 높아 김 양식이 주로 이루어 지고 있는 해남군과 진도 사이의 해역과 도암만의 하부에 위치한 조사정점 1의 연안에서 단위면적당 엽중량이 높았다 (Fig. 2c). 방사무늬김 엽체의 엽장, 엽폭, 단위면적당 엽중량과 같은 형태적 특성에 대하여 유의성을 검정한 결과 엽장과 엽폭, 엽장과 단위면적당 엽중량, 엽폭과 단위면적당 엽중량에 있어서 유의한 관계를 보였다 ($P<0.001$). 단위면적당 Chl *a* 농도 중 최고 평균농도는 정점 4의 17.77 mg Chl *a* DW m^{-2}, 최

Table 1. Chl *a*, O_2 evolution, CO_2 fixation, Production (P), P/Chl *a* of *Porphyra yezoensis* Ueda. Values represent means±SE. Seaweed collected at the study site in March 2011 (n=10)

Parameters	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6
Chl *a* (mg Chl *a* DW m^{-2})	13.90	5.05	8.79	17.77	10.21	2.18
O_2 evolution (mg O_2 m^{-2} h^{-1})	168.28±10.08	156.90±38.59	154.54±5.76	155.09±7.78	135.62±3.17	150.85±15.55
CO_2 fixation (mg CO_2 m^{-2} h^{-1})	231.38±13.86	215.74±53.06	212.49±7.92	213.25±10.69	186.48±4.36	207.42±21.38
Production (mg C m^{-2} h^{-1})	63.10±3.78	58.84±14.47	57.95±2.16	58.16±2.92	50.86±1.19	56.57±5.83
P/Chl *a* (mg C h^{-1}/mg Chl *a*)	4.54	11.65	6.59	3.27	4.98	26.00

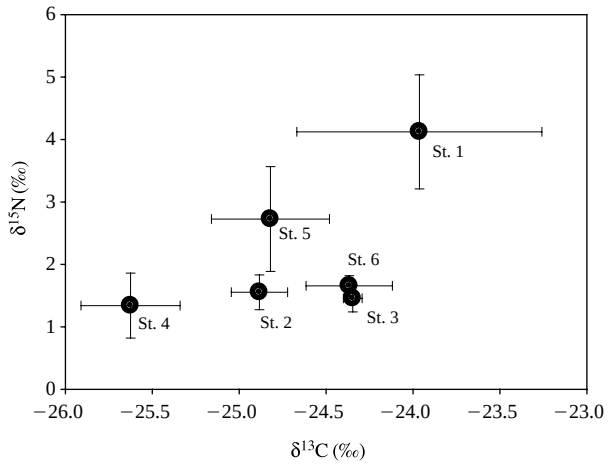

Fig. 4. Dual plot of average of $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ values of *Porphyra yezoensis* Ueda occurred on the southwestern coast of the Korean peninsula. Seaweed collected at the study site in March 2011 (n=3).

저 평균농도는 정점 6의 2.18 mg Chl *a* DW m^{-2}이었으며, 전체 평균농도는 9.65 mg Chl *a* DW m^{-2}이었다(Table 1).

방사무늬김의 탄소 농도 중 최고 평균농도는 정점 6의 316.5±2.11 mg DW g^{-1}, 최저 평균농도는 정점 2의 201.1±7.8 mg DW g^{-1}이었으며, 전체 평균농도는 239.7±6.5 mg DW g^{-1}이었다(Fig. 3a). 방사무늬김의 질소 농도 중 최고 농도는 정점 5의 50.0±3.1 mg DW g^{-1}, 최저 농도는 정점 1의 39.8±1.5 mg DW g^{-1}이었으며, 전체 평균농도는 43.5±1.8 mg DW g^{-1}이었다(Fig. 3b). 또한, C/N비의 경우 최고는 정점 6에서 6.7이고, 최저는 정점 3에서 5.0이었으며, 전체 평균 C/N값은 5.5±0.3이었다(Fig. 3c). 방사무늬김 엽체의 탄소 농도와 질소 농도는 조사 정점 5번과 6번이 높아 김 양식이 주로 이루어 지고 있는 해남군과 진도 사이의 해역에서 방사무늬김 엽체의 탄소 농도와 질소 농도가 높은 농도를 보였다. 방사무늬김 엽체의 탄소 및 질소 농도와 조사정점 간에 유의성을 검정한 결과 탄소 농도는 정점간에 유의한 관계를 보였고($P<0.05$), 질소 농도도 정점간에 유의한 관계를 보였다($P<0.001$).

방사무늬김의 방사성 안정동위원소비 중에서 탄소 안정동위원소 비는 $\delta^{13}C=-25.6\pm0.3$‰에서 $\delta^{13}C=-24.0\pm0.7$‰의 범위로 평균 $\delta^{13}C=-24.7\pm0.3$‰의 값을 보였고, 질소 안정동위원소 비는 $\delta^{15}N=1.3\pm0.5$‰에서 $\delta^{15}N=4.1\pm0.9$‰의 범위로 평균 $\delta^{15}N=2.1\pm0.5$‰의 값을 보여 탄소 질소 안정동위원소 비 모두 정점간 차이를 보였다(Fig. 4). 또한, 정점 1에서 탄소 및 질소 안정동위원소 비가 각각 $\delta^{13}C=-24.0\pm0.7$‰, $\delta^{15}N=4.1\pm0.9$‰로 다른 정점과는 차이를 보였다. 방사무늬김 엽체의 안정동위원소 비와 조사정점 간에 유의성을 검정한 결과 탄소 안정동위원소 비는 정점간에 유의한 차이를 보이지 않았고($P=0.151$), 질소 안정동위원소 비는 정점간에 유의한 관계를 보이는 것으로 나타났다($P<0.05$).

2. Diving-PAM에 의한 광합성 특성

Diving-PAM에 의한 광합성 효율은 방사무늬김 엽체를 암 적응시켜 상대적인 양자수율과 전자 전달율을 구하는 것으로, 방사무늬김이 광합성 하는 명반응의 과정 중 암 적응 상태에서 광계 II의 광화학 반응에 대한 양자수율 중 최대 양자수율은 정점 간에 큰 차이를 보이지 않았지만 최고 값은 정점 2의 0.55±0.02, 최저 값은 정점 4의 0.46±0.07이었으며, 전체 평균 값은 0.52±0.03이었다(Table 2).

상대 전자 전달률 중 최고 값은 정점 2의 6.55 μmol electrons m^{-2} s^{-1}, 최저 값은 정점 5의 5.01 μmol electrons m^{-2} s^{-1}이었다(Fig. 5). 측정된 상대 전자 전달률의 경우

Table 2. Maximal quantum yield (Fv/Fm), photosynthetic efficiency (α), minimum saturating irradiance (E_k) and maximal relative electron transport rate ($rETR_{max}$ of *Porphyra yezoensis* Ueda. Values represent means±SE. Seaweed collected at the study site in March 2011 (n=10)

RLC parameters	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6
Fv/Fm	0.54±0.02	0.55±0.02	0.55±0.03	0.46±0.07	0.49±0.02	0.54±0.02
α	0.045±0.004	0.030±0.007	0.042±0.004	0.034±0.001	0.027±0.002	0.040±0.005
E_k (μmol photons m^{-2} s^{-1})	130±8	180±26	139±17	171±2	175±11	140±26
$rETR_{max}$ (μmol electrons m^{-2} s^{-1})	5.84±0.35	5.45±1.34	5.37±0.20	5.39±0.27	4.71±0.11	5.24±0.54

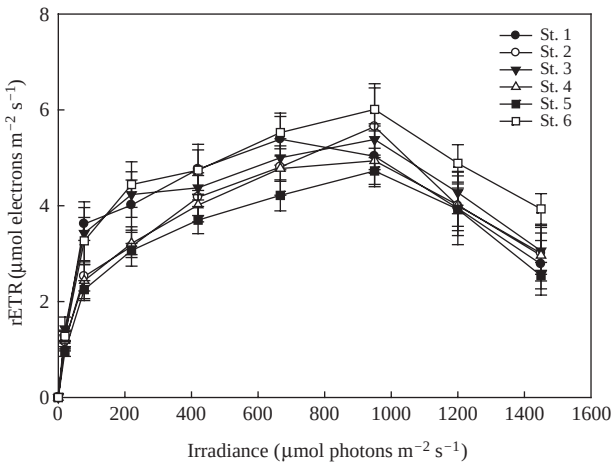

Fig. 5. Variations of rETR (relative electron transport rate) of *Porphyra yezoensis* Ueda occurred on the southwestern coast of the Korean peninsula. Seaweed collected at the study site in March 2011 (n=10).

초기값은 로그함수적으로 증가 하였으며, 950 μmol photons m^{-2} s^{-1} 광도에서 최고를 보인 반면 정점 1은 667 μmol photons m^{-2} s^{-1} 광도에서 최고 상대 전자 전달률을 나타내었다.

최대 전자 전달률 중 최고 값은 정점 1의 5.84±0.35 μmol electrons m^{-2} s^{-1}, 최저 값은 정점 5의 4.71±0.11 μmol electrons m^{-2} s^{-1}이었으며, 전체 평균 값은 5.33±0.47 μmol electrons m^{-2} s^{-1}이었다 (Table 2). 정점 5번을 제외하면 5.2 μmol electrons m^{-2} s^{-1} 이상으로서 각 정점별 비슷한 광합성 능률을 보였다.

기울기 (α)는 정점 1, 3 및 6번에서 높은 값을 보였으며, 그 중 최고 값은 정점 1의 0.045±0.004, 최저 값은 정점 5의 0.027±0.002이었으며, 전체 평균 값은 0.036±0.004이었다 (Table 1). 전자전달을 위한 포화광은 지역에 따라서 일부 차이를 보였으나 최고 값은 정점 2의 180±26 μmol photons m^{-2} s^{-1}, 최저 값은 정점 3의 139±17 μmol photons m^{-2} s^{-1}이었으며, 전체 평균 값은 156±15 μmol photons m^{-2} s^{-1}이었다.

식물의 광합성 반응식에 의거하여 이론적으로 4 μmol electrons m^{-2} s^{-1}는 1 μmol O_2 m^{-2} s^{-1}가 발생하며 (O_2/ETR =1/4), O_2 발생과 CO_2 고정은 mol 대 mol로 1 : 1 대응한다. 따라서, 각 정점에 대한 O_2 발생량, CO_2 고정량, 생산력 (P), P/Chl *a*를 살펴보면 다음과 같다. O_2 발생량, CO_2 고정량, 생산력 중 최고 값은 정점 1에서 각각 168±10 mg DW O_2 m^{-2} h^{-1}, 231±14 mg DW CO_2 m^{-2} h^{-1}, 63±4 mg DW C m^{-2} h^{-1}이었고, 최저 값은 정점 5에서 각각 136±3 mg DW O_2 m^{-2} h^{-1}, 186±4 mg DW CO_2 m^{-2} h^{-1}, 51±1 mg DW C m^{-2} h^{-1}이었으며, 전체 평균 값은 각각 154±14 mg DW O_2 m^{-2} h^{-1}, 211±19 mg DW CO_2 m^{-2} h^{-1}, 58±5 mg DW C m^{-2} h^{-1}이었다 (Table 1). 또한, P/Chl *a*를 살펴보면 다음과 같다. 최고 값은 정점 6에서 26 mg C h^{-1} mg^{-1} Chl *a*이었고, 최저 값은 정점 4에서 3.27 C h^{-1} mg^{-1} Chl *a*이었으며, 전체 평균 값은 10 mg C h^{-1} mg^{-1} Chl *a*이었다 (Table 1).

고 찰

방사무늬김의 형태적 특성은 한국산 김속 식물 중 체형의 변화가 가장 심한 종으로서 도란형, 도피침형, 원형, 난형 또는 신장형이며, 조사기간 동안 방사무늬김 엽장은 11.6～16.3 cm, 엽폭은 4.6～6.3 cm로서, 황과 이 (2001)의 엽장 3～13 cm, 엽폭 1～9 cm로서 엽장은 더 긴 것으로 나타났으나, 엽폭은 좁은 것으로 나타났다.

김 등 (2012)의 군집 분석에 의한 조사정점 간의 결과에 의하면 2개의 뚜렷한 정점 군 (조사정점 1번, 5번과 6번 및 조사정점 2번, 3번과 4번)으로 구분이 되었고, 조사정점 1번과 6번은 수심이 2～2.4 m로서 지주식으로 방사무늬김을 양식하고 있으며, 2～5번은 수심이 14～35 m로서 부류식으로 방사무늬김을 양식하고 있어 방사무늬김이 양식되고 있는 지역적인 차이와 해양환경적인 요인이 작용한다고 하였다.

방사무늬김 중 탄소 및 질소 농도를 보면 Yamamoto

and Takao (1988)은 탄소 농도가 341.9±24.8 (249.3～464.8) mg DW g^{-1}, 질소 농도가 52.5±10.4 (27.2～76.1) mg DW g^{-1}, C/N비가 6.8±1.58 (4.25～12.53)이라 하였고, Kawaguchi *et al.* (2003)은 아리야케 만에서 조사된 탄소 농도가 511.2±27.6 mg DW g^{-1}, 질소 농도가 120.4±11.2 mg DW g^{-1}, C/N비가 5.1이라 하였으며, Carvalho *et al.* (2009)은 요시하마 만에서 조사된 탄소 농도가 413 mg g^{-1} DW, 질소 농도가 60 mg g^{-1} DW, C/N비가 5.9이라 하였다. 본 조사 지역 방사무늬김의 탄소 농도는 240 (201～317) mg DW g^{-1}이었고, 질소 농도는 44 (40～50) mg DW g^{-1}로서 서식환경이나 주변환경이 다르지만 김이 양식되고 있는 다른 지역에 비하여 탄소 및 질소 농도가 비슷하거나 낮은 값을 보이고 있었으며, C/N값은 5.5로 비슷하였다. 또한, 실험실의 결과로서 높은 암모늄염이 흐르는 물에 노출된 방사무늬김의 생리학적 반응에서 노출 전에 방사무늬김 조직의 질소 농도는 57±2 mg g^{-1} DW를 보였고, 노출 후에는 10% 이상 증가한 63±1 mg DW g^{-1}를 보였으며, C/N비가 노출 전에는 7.2에서 노출 후 24시간 지난 후에는 6.6을 보였다 (Kang *et al.* 2009). 따라서, 방사무늬김의 탄소와 질소 농도는 방사무늬김의 서식환경이나 주변의 조건들에 의하여 영향을 받는 것으로 보인다. 본 조사에서의 질소 농도는 44 mg DW g^{-1}로서 강과 고 (1977)에 의한 방사무늬김이 정상적으로 생장하는데 필요한 질소 요구량인 55～70 mg DW g^{-1}과 최소요구량 및 절대 필요량은 각각 40～50 mg DW g^{-1}와 12～13 mg DW g^{-1}으로서 방사무늬김이 정상적으로 생장하는데 필요한 질소 요구량 보다는 낮았으나 최소요구량은 만족하는 것으로 나타났다.

방사무늬김의 탄소 및 질소 안정동위원소 비 값을 보면, Carvalho *et al.* (2009)의 요시하마 만에서 조사된 탄소 안정동위원소 비 값은 $\delta^{13}C=-23.4‰$를 보였고, Yokoyama *et al.* (2005)의 탄소 안정동위원소 값은 $\delta^{13}C=-16.7‰$이고, 질소 안정동위원소 비값은 $\delta^{15}N=12.4‰$를 보였다. 따라서, 본 조사에서의 탄소 및 질소 안정동위원소 비가 $\delta^{13}C=-25.6‰$에서 $\delta^{13}C=-24.0‰$범위, $\delta^{15}N=1.3‰$에서 $\delta^{15}N=4.1‰$의 범위로 정점간 차이를 보이고 있는 것은 생육환경과 광합성에 의한 질소동화의 물질대사나, CO_2 고정의 차이에 따라 나타나는 현상으로 판단된다 (김 1991).

광합성 효율은 방사무늬김 엽체를 암 적응시켜 상대적인 양자 수율과 상대전자전달률을 구하는 것으로, 조사 정점에 의한 최대 양자 수율은 0.46～0.55 범위로서 Kang *et al.* (2009)의 방사무늬김의 최대양자수율 0.54～0.65보다 낮거나 비슷한 값을 보였으며, Zhang *et al.* (2011)의 방사무늬김의 최대양자수율 0.17～0.22보다는 높은 값이 나타났다. Korbee *et al.* (2005a, b)에 의한 *Porphyra leucosticta*에 대해서는 0.68±0.02과 0.70±0.03을 보였고, *Porphyra umbilicalis*의 경우는 0.44±0.02를 보여 김 종류나 서식 지역에 따라서 0.17～0.70의 범위를 보이는 것으로 나타났다. Korbee *et al.* (2005a, b)에 의한 *Porphyra leucosticta*에 대해서는 상대전자전달률은 2.84±0.4와 1.50±0.29를 보였고, *Porphyra umbilicalis*의 경우는 3.90±0.98을 보여 본 조사시의 5.01～6.55 μmol electrons m^{-2} s^{-1}로서 김 종류에 따라서 광합성 효율은 2.84～6.55의 범위를 보였다. 단위 엽록소 당 전자 전달률로 잠재적인 광합성 능력을 의미하는 최대상대전자전달률은 4.71～5.84 μmol electrons m^{-2} s^{-1} 범위로서 Kang *et al.* (2009)의 방사무늬김에 대한 최대상대전자전달률 10.3±0.4～15.1±1.1 μmol electrons m^{-2} s^{-1}보다는 낮은 값을 보였다. 김 등 (2012)에 의한 본 연구 지역에서의 군집 분석 결과 지역적인 차이와 해양 환경적 요인 등에서와 같이 김의 종류나 서식 지역에 따라서 달라지고, 현장과 실내 실험의 조건에 따라서 달라 지는 것으로 나타났다.

Gantt (1990)는 방사무늬김의 포화광 및 성장을 위한 광 값을 Kato and Aruga (1984)의 논문으로부터 재 계산을 하였는데 각각 130 μmol photons m^{-2} s^{-1}, 180 μmol photons m^{-2} s^{-1}이라고 하였다. 조사된 김의 포화광 값은 139～180 (156) μmol photons m^{-2} s^{-1}로서 Kato and Aruga (1984)와 비슷한 값을 보였고, 조사정점의 표면 광량은 평균 2,485 μmol photons m^{-2} s^{-1}로서 성장을 위한 광 조건이 제한요인으로 작용하지 않았다.

식물의 광합성 반응식에 의거하여 이론적으로 4 μmol electrons m^{-2} s^{-1}는 1 μmol O_2 m^{-2} s^{-1}가 발생하고 (O_2/ETR=0.25), Beer *et al.* (2000)은 파래에 대하여 평균 몰 O_2/ETR 비는 0.249±0.044를 발표하였고, 일반적으로 통용되고 있는 이론적인 값인 O_2/ETR=0.25를 일반적인 값으로 사용하여도 될 것으로 판단된다. 국립수산과학원 (2012)에 의하면 측정온도 15°C 실내에서 양식 방사무늬김의 광량 의존성 산소 발생률을 조사하였는데, 포화광 (100～125 μmol photons m^{-2} s^{-1}) 하에서 조사 정점 1의 경우 약 2.0 μg FW O_2 mg^{-1} hr^{-1}, 조사 정점 3의 경우 약 3.5 μg FW O_2 mg^{-1} hr^{-1}, 조사 정점 5의 경우 약 3.3 μg FW O_2 mg^{-1} hr^{-1}로 나타났으며, 단위 면적당 산소 발생률은 200～350 mg O_2 m^{-2} hr^{-1}로서 본 연구의 산소 발생율인 136～168 mg O_2 m^{-2} hr^{-1}보다 높은 값을 보였다. 남서해역 방사무늬김 엽체의 탄소 및 질소 농도와 광합성 효율은 지역에 따른 큰 차이는 보이지 않았다. Diving-PAM에 의한 현장에서의 광합성 특성은 양식 시기를 고려한 추가적인 연구가 수행되어야 하지만 본 조사 지역

은 김 등(2012)의 결과에서와 같이 지역적인 차이와 해양 환경적 요인으로 인한 조사정점 간의 차이를 보일 것으로 판단 하였으나, 낮은 최대 양자수율과 최대 상대전자전달률로 인한 낮은 광합성 효율로 나타났다.

적 요

일반적으로 많이 양식되는 방사무늬김 (*Porphyra yezoensis* Ueda)에 대하여 방사무늬김 엽체의 형태적 특성, 탄소 및 질소 성분의 농도, 안정동위원소 비값, 광합성 효율을 방사무늬김 양식이 이루어 지고 있는 남서해역에서 조사를 하였다. 방사무늬김의 형태적 특성에 대해서 살펴보면 평균 엽장은 11.6～16.3 (13.8) cm, 평균 엽폭은 4.6～6.3 (5.4) cm이었고, 단위면적당 방사무늬김 엽체의 평균 엽중량은 1.1～2.6 (1.86) g DW m^{-2}이었다. 단위면적당 Chl *a* 농도는 2.18～17.77 (평균 9.65) mg DW Chl *a* m^{-2}이었다. 방사무늬김의 탄소 농도는 201～317 (240) mg DW g^{-1}이었고, 질소 농도는 39.8～50.0 (43.5) mg DW g^{-1}이었으며, C/N비는 5.0～6.7 (5.5)이었다. 방사무늬김의 방사성 안정동위원소비 중에서 탄소 안정동위원소 비는 $\delta^{13}C=-25.6‰$에서 $\delta^{13}C=-24.0‰$ (평균 −24.7‰)의 값을 보였고, 질소 안정동위원소 비는 $\delta^{15}N=1.3‰$에서 $\delta^{15}N=4.1‰$ (평균 2.1‰)의 값을 보였다.

PAM에 의한 해조류의 광합성 특성은 광합성 활동의 지시자로서 사용될 수 있다. 우리는 Diving-PAM을 이용하여 각 정점 해조류인 방사무늬김의 광합성율을 분석하였다. 최대양자수율은 0.46～0.55 (평균 0.52)로서 최대양자수율의 변동은 정점간 큰 차이는 없었다. 최대상대전자전달률은 4.71～5.84 (평균 5.33) μmol electrons m^{-2} s^{-1}로서 최대양자수율과 비슷한 분포를 보였다. 기울기 (α)는 0.027～0.045 (평균 0.036)을 보였고, 전자전달을 위한 포화광은 지역에 따라서 일부 차이를 보였으나 139～180 (156) μmol photons m^{-2} s^{-1}이었다. 남서해역 방사무늬김 엽체의 탄소 및 질소 농도와 광합성 효율은 지역에 따른 큰 차이는 보이지 않았다. 광합성 특성은 낮은 최대양자수율과 최대 상대전자전달률로 인한 낮은 광합성 효율이 나타났다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원 (RP-2012-ME-042)의 지원에 의해 운영되었으며, 무명의 심사자의 지적에 의해 본 논문의 질이 향상되었으며 이에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

강제원, 고남표. 1977. 해조양식. 대한교과서주식회사. 태화출판사. 부산. 294pp.

국립수산과학원. 2012. 남・서해안에서의 해양생태계 변화에 따른 김 양식장 적정 수용량 등 조사. 2011년도 국립수산과학원 사업보고서. 86pp.

김규한. 1991. 동위원소 지질학. 민음사. 서울. 552pp.

김영환. 1996. 해산 식물학. 형설출판사. 서울. 293pp.

김정배, 이원찬, 홍석진, 심정희, 박정임, 박지혜, 이유진. 2012. 남서해역에서 양식되는 방사무늬김 (*Porphyra yezoensis* Ueda)의 색소조성과 농도에 영향을 미치는 해양환경 특성. 환경생물. 30:200-209.

목종수, 이태식, 손광태, 송기철, 권지영, 이가정, 김지회. 2011. 한국 연안산 방사무늬김 (*Porphyra yezoensis*)의 일반성분 및 미네랄 함량. 한수지. 44:554-559.

최태섭, 김광용. 2005. 구멍갈파래의 생태생리에 대한 생육기질의 효과. Algae 20:369-378.

홍영남. 2001. 광합성. pp.155-172. 생물학 (이광웅, 구혜영, 김 원, 양재섭, 윤권상, 이종섭, 최청일, 홍영남 공역). 을유문화사. 서울.

황미숙, 김승오, 이영순, 박은정, 김성철, 하동수, 공용근, 백재민, 최한구. 2010. 참김 (*Porphyra tenera* Kjellman) 색소 및 형태 변이체의 순계주 분리 및 특성. 한수지. 43:495-502.

황미숙, 이인규. 2001. 한국산 홍조식물 김속 (*Porphyra*)의 분류. Algae 16:233-273.

황미숙, 정익교, 오윤식. 1997. 한국산 홍조식물 참김 (*Porphyra tenera* Kjellman)과 방사무늬김 (*P. yezoensis* Ueda)의 온도반응. Algae 12:207-213.

Beer S, C Larsson, O Poryan and L Axelsson. 2000. Photosynthetic rates of *Ulva* (Chlorophyta) measured by pulse amplitude modulated (PAM) fluorometry. Eur. J. Phycol. 35:69-74.

Carvalho MC, K-I Hayashizaki and H Ogawa. 2009. Short-term measurement of carbon stable isotope discrimination in photosynthesis and respiration by aquatic macrophytes, with marine macroalgal examples. J. Phycol. 45:761-770.

Chung B-C, HJ Hwang, J-H Kim and C-H Lee. 2002. Using chlorophyll fluorescence to study phytosynthesis. pp.33-46. In Recent trends in natural sciences: Photosynthesis and the environmental stress (Lee C-H ed.). Pusan National University Press. Busan.

Gantt E. 1990. Pigmentation and photoacclimation. pp.203-220. In Biology of the red algae (Cole KM and RG Sheath eds.). Cambridge University Press. Cambridge.

Kang YH, SR Park, JH Oak, JA Shin and IK Chung. 2009. Physiological responses of *Porphyra yezoensis* Ueda (Bangiales, Rhodophyta) exposed to high ammonium effluent in a sea-

weed-based integrated aquaculture system. J. Fish. Sci. Technol. 12:70-77.

Kato M and Y Aruga. 1984. Comparative studies on the growth and photosynthesis of the pigmentation mutant of *Porphyra yezoensis* in laboratory culture. Jap. J. Phycol. 32:333-347.

Kawaguchi O, T Yamamoto and T Hashimoto. 2003. Carbon, nitrogen and phosphorus contents of cultured Nori (*Porphyra yezoensis*). J. Grad. Sch. Biosp. Sci. Hiroshima Univ. 42: 7-9.

Korbee N, FL Figueroa and J Aguilera. 2005a. Effect of light quality on the accumulation of photosynthetic pigments, proteins and mycosporine-like amino acids in the red alga *Porphyra leucosticte* (Bangiales, Rhodophyta). J. Photochem. Photobiol. B: Biol. 80:71-78.

Korbee N, P Huovinen, FL Figueroa, J Aguilera and U Karsten. 2005b. Availability of ammonium influences photosynthesis and the accumulation of mycosporine-like amino acids in two *Porphyra* species (Bangiales, Rhodophyta). Mar. Biol. 146:645-654.

Ralph PJ, R Gademann and WC Dennison. 1998. In situ seagrass photosynthesis measured using a submersible pulse amplitude modulated fluorometer. Mar. Biol. 132:367-373.

Schreiber U. 2004. Pulse-amplitude-modulation (PAM) fluorometry and saturation pulse method: an overview. pp.279-319. In Chlorophyll fluorescence: a signature of photosynthesis (Papageorgiou GC and Govindjee eds.). Springer, Dordrecht, The Netherlands.

Shin J-A. 2003. Inheritance mode of some characters of *Porphyra yezoensis* (Bangiales, Rhodophyta) II. Yield, photosynthetic pigments content, red rot disease-resistance, color, luster and volatile sulfur compounds concentration. Algae 18:83-88.

Yamamoto T and M Takao. 1988. Effects of temperature on the uptake kinetics of ammonia-N and nitrate-N by *Porphyra yezoensis* thalli. Jap. J. Phycol. 36:37-42.

Yokoyama H, A Tamaki, K Koyama, Y Ishihi, K Shimoda and K Harada. 2005. Isotope evidence for phytoplankton as a major food source for macrobenthos on an intertidal sandflat in Ariake sound, Japan. Mar. Ecol. Prog. Ser. 304:101-116.

Zhang T, Z Shen, P Xu, J Zhu, Q Lu, Y Shen, Y Wang, C Yao, J Li, Y Wang and H Jiang. 2011. Analysis of photosynthetic pigment and chlorophyll fluorescence characteristics of different strains of *Porphyra yezoensis*. J. Appl. Phycol. (published online)

Received: 30 July 2012
Revised: 5 September 2012
Revision accepted: 6 September 2012